Результаты расчетов показывают, что такая конструкция позволила переместить максимальные напряжения в стенке из зоны уторного узла на середину высоты стеновых панелей, причем сами стеновые панели работают на сжатие, а кольцо жесткости, установленное на середине высоты панелей, работает на растяжение. В зоне уторного узла отсутствует так называемый «пластический шарнир», все элементы конструкции упруго деформируются, напряжения элементов намного ниже предела текучести. Кроме того, места максимальных напряжений находятся вне контакта с продуктом, что позволит сократить сроки ремонта, увеличить межремонтный период. Днище у такого резервуара плоское – без конуса.

Анализ технических характеристик показал перспективность его применения ввиду очевидных преимуществ перед используемыми ныне:

– гарантированное увеличение прочности и устойчивости резервуара, достаточные для эксплуатации в сейсмоопасных районах;
– повышение безопасности в случае аварийной ситуации;
– уменьшение площади застройки;
– увеличенная срока службы и межремонтных периодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абовский, Н.П. Управляемые конструкции и системы : учеб.-метод. комплекс / Н.П. Абовский, А.В. Максимов. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 149 с.
2. Горелов, А.С. Неоднородные грунтовые основания и их влияние на работу вертикальных стальных резервуаров / А.С. Горелов. – СПб. : ООО «Недра», 2009. – 220 с.
3. Павилайнен, В.Я. Расчет оболочек в многоволновых системах / В.Я. Павилайнен. – Л. : Стройиздат, 1973. – 134 с.

УДК 622.276.76

УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА ИЗГИБ

М. И. Казымов
Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия, Баку, Азербайджан

Передвижные агрегаты, типа KORO 80/100 и др., насосные установки типа 4АН-700 и др., для выполнения спускоподъемных работ и закачки жидкости в скважину при гидравлическом разрыве пласта часто, проезжая по грунтовым дорогам подвергаются повторяющимся нагружениям.

В результате элементы конструкций этих агрегатов (пружинные амортизаторы, балки, крюки и др.) могут разрушаться под действием напряженного состояния, когда путь нагружения не выходит за рамки поверхности текучести в пространстве напряжений.

Поэтому определение передела выносливости, числа циклов, вызывающих разрушение элементов конструкций, работающих на чистый изгиб в зависимости от изгибающего момента, момента сопротивления поперечного сечения и механических характеристик материала бруса является актуальным вопросом.

Известно, что когда передвижные агрегаты типа (КОРО80/100, 4АН700 и др.) используемые в нефтяной промышленности, передвигаются по грунтовым дорогам, они подвергаются повторяющимся нагружениям. В результате элементы конструкции, находящиеся на самоходных устройствах, могут разрушаться под действием напряженного состояния, когда путь нагружения не выходит за рамки поверхности текучести в пространстве напряжений. Многие элементы конструкций, находящиеся на самоходных устройствах, при их перемещении работают на изгиб. К таким элементам можно отнести амортизаторы из плоских пластина и пружинные амортизаторы, шасси автомобиля, которые можно моделировать как балки на упругих основаниях. Кроме этих элементов, повторяющимся нагружениям подвергаются также крюки подъемных кранов передвижных агрегатов, которые моделируются как брусы большой кривизны [2].

Рассмотрим чистый изгиб.

Настоящая работа посвящена выявлению условий, способствующих минимизации усталостных разрушений элементов конструкций, работающих на чистый изгиб.

Как известно, под чистым изгибом понимается такой вид нагружения, при котором в поперечных сечениях бруса возникают только изгибающие моменты, а поперечные силы равны нулю. При этом изгибающий момент по длине бруса не меняется, т. е. $M_{из}$ = const. Если материал бруса однородный, при чистом изгибе ось бруса получает форму дуги окружности [2].

Известно также, что при чистом изгибе в поперечных сечениях действует только нормальное напряжение и продольные волокна не оказывают влияние друг на друга т. е. в продольных сечениях напряжение равно нулю. При чистом изгибе на брус действуют пары сил. Поэтому одна часть бруса растягивается, а другая часть сжимается. Следовательно, существует линия, которая не растягивается и не сжимается. Геометрическое место точек, где нормальное напряжение σ равно нулю, называется нейтральной линией.

Систему координат выберем так, чтобы ось z направлялась по нейтральной линии, а плоскость oxy совпала с поперечным сечением бруса, причем плоскость действия пар сил совпала с плоскостью oyz, а ось x была перпендикулярна к плоскости изгиба балки, т. е. изгиб бруса происходил вокруг оси x. В такой системе координат, как известно, нормальное напряжение в поперечном сечении имеет вид [2]

$$\sigma = \frac{My}{J_x}, \qquad (1)$$

где М – изгибающий момент в поперечном сечении; J_x – момент инерции поперечного сечения относительно оси x, σ – нормальное напряжение с координатой y.

Тогда из зависимости (1) имеем

$$\sigma_{\max} = \frac{My_{\max}}{J_x} = \frac{M}{W_x}, \qquad (2)$$

где

$$W_x = \frac{J_x}{y_{\max}}, \qquad (3)$$

W_x – момент сопротивления относительно оси x.

Как видно из (2), чем больше момент сопротивления поперечного сечения, тем меньше максимальное значение нормального напряжения. Наиболее экономичными являются такие формы поперечных сечений, для которых с наименьшей затратой материала получается наибольшая величина момента сопротивления W_x. Чтобы форма сечения была рациональной, необходимо, очевидно, по возможности распределять площадь сечения подальше от нейтральной оси. Сечения двухтавров и швеллеров выбирались именно исходя из этой идеи.

Условие прочности при чистом изгибе имеет вид

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} \le [\sigma] \qquad (4)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение при растяжении.

Из (4)

$$W_x \ge \frac{M}{[\sigma]}. \qquad (5)$$

Из условия выбираются поперечные размеры бруса, позволяющие обеспечить прочность балки при изгибе.

Известно, что при циклическом нагружении брус может разрушаться при напряжениях более низких, чем напряжения, вызванные действием статических нагрузок [4].

В работе [1] получено выражение для числа циклов, вызывающих разрушение элемента конструкции при произвольном нагружении в следующем виде:

$$N=\frac{2\sigma_{в}^{2}}{\left[J_1^2+2(1+v)J_2-(1+v)\sigma_{ij}\sigma'_{ij}+vJ_1J'_1\right](1-k_0)}, \qquad (6)$$

где N – число циклов, необходимых для разрушения материала; $\sigma_{в}$ – предел выносливости; ν – коэффициент Пуассона материала; J_1, J_2 – соответственно первый и второй инварианты тензора напряжения, компонентами которого являются; σ_{ij}, J'_1 – первый инвариант тензора напряжений; $\sigma'_{ij}, \sigma_{ij}$ и σ'_{ij} – напряжения состояния соответственно в начале и в конце нагружения [3].

$$K_0=\sqrt{\frac{2\sigma_{в}^{2}}{J_1^2+2(1+v)J_2}-1}. \qquad (7)$$

В (6) по повторяющимся индексам i и j производится суммирование от 1 до 3. В частности, если после снятия внешних воздействий напряженное состояние исчезает, то $\sigma'_{ij}=0$ и равенство (6) получает вид

$$N=\frac{2\sigma_{b}^{2}}{\left[J_1^2+2(1+v)J_2\right](1-k_0)}. \qquad (8)$$

Для рассматриваемого случая $\sigma_{11}=\sigma; \sigma_{12}=\sigma_{22}=\sigma_{23}=\sigma_{33}=\sigma_{13}=0$;

$J_1=\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33}=\sigma;\ \ J_2=\sigma_{11}\sigma_{22}+\sigma_{11}\sigma_{33}+\sigma_{22}\sigma_{33}=0;\ k_0=\sqrt{\frac{2\sigma_{в}^{2}}{\sigma^2}-1}$.

Подставляя эти выражения в (8) имеем

$$N=\frac{2\sigma_{в}^{2}}{\sigma^2\left(1-\sqrt{\frac{2\sigma_{в}^{2}}{\sigma^2}-1}\right)}=\frac{2\sigma_{в}^{2}}{\sigma\left(\sigma-\sqrt{2\sigma_0^2-\sigma^2}\right)}. \qquad (9)$$

Когда знаменатель дроби в правой стороне равенства (9) стремится к нулю, оставаясь положительным (потому, что N – число циклов и является натуральным числом), число циклов N стремится к бесконечности, т. е. усталостное разрушение не происходит.

$$\sigma = \sqrt{2\sigma_в^2 - \sigma^2} \geq 0,$$

откуда

$$\sigma \leq \sigma_в. \qquad (10)$$

Действительно усталостное разрушение не происходит в том случае, если

$$0 \leq \sigma \leq \sigma_в. \qquad (11)$$

Равенство (9) перепишем в следующем виде:

$$N = \frac{2\sigma_в^2}{\sigma^2 - \sigma\sqrt{2\sigma_в^2 - \sigma^2}}. \qquad (12)$$

Известно, что

$$\sigma_e^2 = 2\sigma_в^2, \qquad (13)$$

где σ_e – предел упругости.

Если в частном случае $\sigma = \sigma_e$, т. е. $\sigma^2 = 2\sigma_в^2$, то из (12) получается $N = 1$. Это означает, что если напряжение равно пределу упругости, то после первого же цикла начнется пластическая деформация.

Если подставим (2) в (9), для N получаем

$$N = \frac{2\sigma_в^2}{\frac{M}{W_x}\left(\frac{M}{W_x} - \sqrt{2\sigma_в^2 - \frac{M}{W_x^2}}\right)}. \qquad (14)$$

Из (14)

$$N = \frac{2\sigma_в^2 W_x^2}{M\left(M - \sqrt{2W_x^2\sigma_в^2 - M^2}\right)}. \qquad (15)$$

Введем обозначение

$$A^2 = 2\sigma_в^2 W_x^2. \qquad (16)$$

С учетом (16) из (15) имеем

$$N=\frac{A^2}{M\left(M-\sqrt{A^2-M^2}\right)}. \qquad (17)$$

Из (17)

$$A^2=\frac{\left(1+\frac{2}{N}\right)N^2M^2+N^2M^2\sqrt{1+\frac{4}{N}-\frac{4}{N^2}}}{2}. \qquad (18)$$

Учитывая, что число циклов, необходимых для усталостного разрушения, измеряется миллионами, то можно считать, что

$$\frac{4}{N^2}<<\frac{2}{N}<<1.$$

Тогда (18) имеет вид

$$A^2=N^2M^2. \qquad (19)$$

Подставляя (19) в (16), получаем

$$N^2M^2=2\sigma_в^2W_x^2,$$

откуда

$$NM=\sqrt{2}\sigma_в W_x$$

или

$$W_x=\frac{NM}{\sqrt{2}\sigma_в}. \qquad (20)$$

Задавая число циклов всегда из (20), можно выбирать поперечные размеры бруса, обеспечивающие прочность элемента конструкции.

Например, для бруса прямоугольного сечения со сторонами *а* и *в*, согласно [2]

$$W_x=\frac{ab^2}{6}. \qquad (21)$$

Подставляя (21) в (20), имеем

$$\frac{ab^2}{6}=\frac{NM}{\sqrt{2}\sigma_в}.$$

Если $a = kb$, где $k = const$, то из последнего равенства

$$b = \sqrt[3]{\frac{6NM}{\sqrt{2}k\sigma_в}}.$$

Если брус имеет круговое поперечное сечение, то из [2] имеем

$$W_x = \frac{\pi D^3}{32}. \tag{22}$$

Подставляя (22) в (20), получаем

$$D = \sqrt{\frac{32NM}{\pi\sqrt{2}\sigma_в}}.$$

Выводы:

1. Теоретически доказано, что если напряжение не превышает предела выносливости, то брус, работающий на чистый изгиб, может не разрушаясь работать бесконечно долго.

2. Если выполняется условие $\sigma = \sqrt{2}\sigma_в$, то после первого же цикла в брусе возникает пластическая деформация;

3. Получено аналитическое выражение для числа циклов, необходимых для разрушения бруса, работающего на чистый изгиб в зависимости от изгибающего момента, момента сопротивления поперечного сечения и механических характеристик материала бруса.

4. Получено выражение для момента сопротивления поперечного сечения бруса в зависимости от числа циклов, действующего момента и механических характеристик материала бруса.

5. Выбраны поперечные размеры бруса прямоугольного поперечного сечения и круглого поперечного сечения в зависимости от числа циклов, действующего момента предела выносливости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гульгезли А.С. Новая энергетическая теория выносливости при асимметричном нагружении / А.С. Гульгезли // Материалы Респ. науч. конф., посвященной 100-летию Ю.А. Амензаде, Баку, 22 мая 2014 г. / Азербайдж. гос. нефтяная акад. – Баку, 2014. – С. 136.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М. : Наука, 1970. – 544 с.

3. Гульгезли А.С. Пластичность и ползучесть при повторном нагружении Lap Lambert Saabrucken / А.С. Гульгезли. – 2012. – 170 с.

4. Гасанов, Р.А. Новый энергетический подход к теории выносливости / Р.А. Гасанов, А.С. Гульгезли, Ю.А. Оруджев // Известия высш. техн. учеб. заведений Азербайджана. – 2009. – № 2. – С. 23 – 25.